

环境的作用与量子力学的破坏

李世兴

李学潜

沈彭年

(山西省科学技术委员会)

(南开大学物理系)

(中国科学院高能物理所)

量子力学是描写尺度在普朗克常数量级的微观体系的理论,它被我们在广阔范围内的观察所肯定和证实. 我们有理由相信量子力学应是讨论微观体系性质的基础. 从量子力学扩展到量子场论,正如德布罗意多年前评述的,是强调了波粒二象性的另一方面——场的量子化. 原则上说,量子力学和量子场论有许多相通之处.

在我们传统的教科书上均将讨论的量子系统处理为一个孤立系统. 在一般情况下由于环境对系统影响不大,所有的反应(跃迁,散射等)均可视为绝热过程,这种孤立处理是很好的近似. 然而在一些特别的情况下例如高温高密的环境中或我们下面要介绍的,在环境中充满宇宙大爆炸后遗留下来的微黑洞背景下,环境会与系统作用. 这可以体现在对薛定谔方程形式的修正项上, J. Ellis 等人称之为量子力学的破坏. 所谓量子力学破坏是指量子系统初始时刻处于一个纯态(某个力学量完全集合的本征态),然后它可以随时间演变成一个混态.

在通常意义下,量子力学教科书都是仅涉及研究纯态:所谓纯态就是系统可以用几率振幅来描写,因而有干涉性或迭加原理. 而混态与纯态

不同,它不能用几率振幅来描述,而仅能用在某一个态中的几率来确定系统的状态,这时迭加原理或干涉性消失. 可用光的相干性来理解纯态与混态,其实最初关于纯态和混态的定义就是基于光的干涉性质的. 纯态对应两束光从同一个光源出发,它们有相干性,也就是我们可以确定一个光子在某一束光中的几率振幅,而混态表示两束光分别从两个不同光源出发,因而只能说光子在某束光中的几率,没有相干性质.

在量子力学的教科书上,用几率振幅来描写系统状态以及迭加原理是作为基本假定存在的,因而当存在由纯态向混态过渡时,我们可以看到通常意义下量子力学的破坏. 我们知道,薛定谔方程是将有厄米性的哈密顿量 H 作用在波函数上,也就是几率振幅上.

薛定谔方程可写为

$$i \frac{\partial}{\partial t} \varphi = H\varphi. \quad (1)$$

这个简单的方程形式是不可能给出量子力学的破坏的,换言之,如果计入环境对系统的某些特殊影响,若使得系统从纯态过渡到混态,我们必须修改薛定谔方程.

最简单的也有相当普遍意义的是两能级量

i 和 $i+1$ 内的坐标, z 为 (x_i, y_i) 和 (x_{i+1}, y_{i+1}) 这一对共轭点所对应的三维像点离图面的距离.

四、小 结

上面讨论了产生立体感视觉的原因,介绍了两种常见的体视图(红绿体视图和三维幻视图)的原理和计算机生成的算法. 我们看到,视线角的生理效应给出参照距离远近的感觉,而双目视差则给出了相对于参照平面的凹凸. 两种体视图的基本原理相同,不同的仅是观看时

左眼像和右眼像在空间是否叠置,以及随之而来的不同的观看方式. 我们也澄清了两种观看方式的区别;习惯的观看方式是双眼注视景物上一点,同时对此点所在的距离对焦,参照距离与对焦距离相同;而观看三维幻视图时则两眼分别注视图上不同的点,视线在图后某点相交,但双眼仍是对图面聚焦(而不是如某些文献所说对视线相交处的距离聚焦),参照距离不同于对焦距离.

子系统,如 $K^0-\bar{K}^0$, 两代中微子, 中子-质子等, 因而我们就仅限于研究这样的系统. 在大部分文献中和我们自己的一些专题研究中, 我们就特别选择了这样的物理系统做为研究对象.

为了能使纯态和混态都包含在一个理论框架内, 我们用密度矩阵代替波函数来描写系统, 当系统处于纯粹的纯态, 用密度矩阵与用波函数是完全等价的. 其好处在于, 这样我们不但可以统一地描写纯态和混态, 而且很容易将用密度矩阵写成的薛定谔方程推广, 加入“破坏”项, 从而使系统在初态时处于纯态, 当时间不为零后, 而逐渐演化成混态. 将通常的薛定谔方程 (1) 修改为对密度矩阵 ρ 的方程

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = [H, \rho]. \quad (2)$$

这时的哈密顿量 H 是厄米的, 因而在时间演化过程中系统不会从纯态过渡到混态或反过来.

J. Ellis 等人认为, 假如在我们的空间中充满早期宇宙演化残留下的微黑洞, 由于量子引力可以是超距作用, 因而, 这样的环境背景会在 (2) 式中诱发一个反厄米哈密顿量. 这样方程 (2) 就要加入一项 $\delta H \cdot \rho$, 它原则上是不能写入 (2) 式中对易括号内的.

由于我们目前还不可能从基本理论出发推导出这个“破坏”项的形式, J. Ellis 等人根据宇宙空间中充满早期演化时残留下微黑洞的构想, 假定了一个修正哈密顿量, 考虑到黑洞对信息、能量的吸收, 他们建议这附加项是反厄米的. 这个附加项中包含几个未定参数, 要用实验数据来确定. 由于这反厄米哈密顿量的存在, 我们可以得到一个新的, 与 (2) 式结果有根本区别的系统密度矩阵随时间的演化规律, 发现存在一个指数衰减项, 它标明系统从纯态到混态的演化是随时间而不可逆转的. 这意味着, 开始时, 系统由于某种机制 (如从其他粒子的衰变中) 产生, 处于纯态, 而在其后的演化过程中, 由于环境中存在许多小黑洞, 它们破坏了系统的相干性, 从而使系统过渡到一个混态.

将这个机制用到 $K^0-\bar{K}^0$ 系统中, J. Ellis 等与 Huef, Peskin 两个研究小组分别用实验数据去估算这些参数的数值, 他们得到的这些参数都是非常小的.

J. Ellis 等人建议这个反厄米项可能来自于残存的原始黑洞与系统的超引力作用, 因而它们的数量级应与 m^2 / M_{pl} 成正比, 其中 $M_{pl} \sim 10^{19} \text{GeV} / c^2$ 是普朗克能标, m 为涉及的质量 (K 介子等). 由于 δH 是反厄米的, 从这推广的薛定谔方程可知, 系统有 CP 破坏, 文献中还讨论了可能的 CPT 破坏. 由于洛伦兹不变性与 CPT 守恒等价, 如果没有超距作用, CPT 一定守恒. 但由于超引力可以是超距作用, 因而可能导致 CPT 破坏并不奇怪, 这个问题正在被广泛深入地研究. 由于我们研究的一般量子系统所涉及的能标 m 都远远小于普朗克能标, 因而这些参数也就相应地很小, 这我们的理解相吻合. 量子力学得到许多实验的支持, 因而它在一定范围内是正确的理论, 即使这个破坏项存在, 它也一定比较小, 因而不会和以前的实验结果相矛盾. 从另一角度来说, 由于这些参数很小, 它带来的效应在一般情况下不会大, 因而只有相当高精度的实验才有可能对这种量子力学破坏效应进行观察. 然而, 尽管它很小, 但由于它提出对原来理论体系的修正, 因而有重要的物理意义.

另一种量子力学的延伸是由 Reznik 提出的. 他的机制与 J. Ellis 等人的不同, 他假定密度矩阵可以写为 $\rho = \hat{\rho} \hat{\rho}^+$, 这是一个厄米矩阵. 当系统处于纯态时, 很易证明 ρ 和 $\hat{\rho}$ 满足同样的方程 (哈密顿量为厄米的). 他建议在保证几率守恒条件下可以将 (2) 式推广, 但他考虑的不是只能吸取能量而不再释放出来的黑洞, 而是一个作为大热源的环境. 由于它的存在系统的随时间演化也会受到影响, 然而这时系统与周围热源是不断地交换能量与信息, 既可以放出也可以吸收. 尽管薛定谔方程也必须修正和推广, 但量子力学的“破坏”项和微黑洞所导致的形式不同, 因而我们有时也称之为量子力学“扩展”项. Reznik 所引入的附加项是厄米的. 与

微黑洞背景情况不同,用一个很容易得到解的扩展项作为简单的例子,Reznik 导出了系统的演化行为. 由于引入的附加项是厄米的,因而这个推广的方程的解显示系统能在纯态与混态间振荡. 即这个纯态到混态的过程是可逆的. 两种状态可以不断转换.

这很易理解: $\rho = \hat{\rho}\hat{\rho}^+$ 描写系统, $\hat{\rho}\hat{\rho}^+$ 这时并不等于 $\hat{\rho}^+\hat{\rho}$,那么 $\hat{\rho}^+\hat{\rho}$ 很自然地被视作描写环境. 即这个量子系统沉浸在一个大的环境中,不断地和环境相互作用. 我们所关注的系统就不断地在纯态和混态间振荡. 这有些类似于统计力学中我们熟悉的巨正则系综的图象.

但要说明,考虑环境影响的传统方式是基于有限温度场论,计入温度和密度对传播子的影响,然后把它非相对论化写入薛定谔方程中的势函数. 那样做法只能得到对原来哈密顿量的修正,即把(2)式中的 H 改为 H' ,除了能级移动外不会有什么根本性质方面的改变,不会使系统从纯态变成混态. 但破坏项的出现完全改变了系统的性质,使之在纯态和混态间振荡.

这种推广的形式和 J.Ellis 的不同,在 J.Ellis 等人的机制中从纯态到混态的过渡是指数的,因而不可逆的,然而在 Reznik 机制中是振荡的. 可以这样理解这区别的原因. 在 J.Ellis 机制中是大量微黑洞与系统作用. 如众所周知,黑洞一旦吸入什么能量和信息就不会再释放出来,因而过程不可逆. 这体现于我们所讲的指数衰减因子. 而当系统浸在一个大的环境中并与之相互作用,正如统计物理中的巨正则系综,它们只是可逆地互相交换能量与信息,故状态是在纯态与混态间振荡的.

这些修正(或称之为破坏),是可以有观测效应的. J.Ellis 等以及 Huef 研究了在 $K^0-\bar{K}^0$ 系统中的观测,我们也将之用到 $B^0-\bar{B}^0$ 系统中. 另外我们也将 Reznik 的机制用到了中微子振荡的研究中,我们发现了一些有趣的现象. 结果将陆续发表.

这些研究表明,量子力学系统如果不是孤

立和保守的,而是处于一个复杂的环境中,环境可以对系统的时间演化起较大的作用,也可以使能级移动. 在目前大多数实验条件下我们可以认为所研究的系统都是孤立于周围环境的,也就是可以将系统放在一个近似的真空中进行. 然而这个真空的意义是不明确的. 我们实际上面对的真空应是物理真空. 如前面讲述的,在宇宙空间中充满了宇宙演化遗留下来的微黑洞,它构成了真空背景并影响量子力学系统的演化. 如果环境影响不大,改变仅在测量误差允许值中,它的影响就可以忽略,这在通常实验室条件下都是成立的. 然而,在某些特定的情况下,如高温高密的早期宇宙,中子星,或在太阳中的中微子振荡,这些量子力学体系可能会经受环境的作用,著名的关于太阳中微子的 MSW 理论就是计入了一部分太阳介质的影响. 我们最近的工作指出,这一切意味着,当我们研究那些极端情况下的量子力学体系演化过程时,环境的作用可能会影响量子系统的时间演化性质,而不仅仅是能级移动,这对解释太阳中微子问题,或早期宇宙中的一些反应过程可能有比较重要的意义. 这一切意味着,当我们研究那些极端情况下的量子力学演化过程时,环境对量子力学系统的影响应予以认真的考虑.

今天对量子力学的研究已进入了一个新的阶段. 例如对力学量测量问题已不仅仅停留在哲学的讨论上,贝尔不等式可以用实验来检验. 量子力学的研究打开了新的一页. 人们不禁要问,量子力学的描述是否已完整了,薛定谔方程的形式是否可以有破坏或扩展. 人们已将越来越多的注意力转向这些研究上. 当然 J.Ellis 等人的工作受到许多人包括 't Hooft 的批评. 然而我们的逻辑是研究工作不应受任何偏见所左右,只要提出的机制有合理性,就不妨深入进去,研究它的理论基础或应用到唯象学. 当然最终检验真理的标准是实验. 不论理论有多么美,但只要它与实验事实不符就一定是错的,应该被抛弃. 对量子力学的深入研究正沿着这个方向继续发展.